

La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'Office du Niger au Mali)

Roger Bertrand, Bassirou Keita, Mamadou Kabirou N'Diaye

Dans les régions arides et semi-arides, les sols des périmètres irrigués peuvent subir trois formes de dégradation : une salinisation (par accumulation de sels solubles, essentiellement du NaCl), un engorgement (par remontée de nappes phréatiques), une sodisation/alcalinisation (par fixation d'ions sodium sur les argiles associée à une augmentation du pH). Les sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes sont actuellement affectés par les deux derniers types de dégradation, exception faite du delta du Sénégal pour lequel la salinisation est native. Ces phénomènes, pourtant prévisibles, mis à part quelques rares cas, n'ont fait l'objet ni d'une évaluation, ni d'un suivi régulier.

Analyse des causes

Les eaux des grands fleuves sud-sahariens sont très peu minéralisées ; aussi, dans le passé, ont-elles été considérées comme ne présentant aucun risque de salinisation des sols. Par méconnaissance des autres risques, on a négligé le drainage et on s'est contenté de mettre en place un réseau d'évacuation des eaux excédentaires (désigné ici sous le terme de réseau d'assainissement par opposition à un véritable réseau de drainage profond des sols).

Cependant certains aménageurs, tel Bélimé [1] pour l'Office du Niger, justifient leur décision en considérant que, lors de la création des aménagements, la nappe se trouvait à plusieurs dizaines de mètres de profondeur et que, dans ces conditions, on pouvait faire, provisoirement, l'économie d'un tel réseau de drainage. Cet ingénieur affirmait d'ailleurs qu'il laissait la place pour l'installer lorsque la nappe deviendrait gênante. Il prévoyait donc implicitement la remontée inéluctable des nappes. Plus tard, on ne s'est pas préoccupé de suivre leur exhaussement.

Les causes de la remontée des nappes

Les causes de la remontée des nappes sont multiples. Elles tiennent d'une part à un contrôle très approximatif et à une mauvaise efficacité de l'utilisation de l'eau, et d'autre part à des dysfonctionnements du réseau d'évacuation des eaux excédentaires.

• Une irrigation mal contrôlée

La distribution de l'eau dans les périmètres irrigués des grandes vallées alluviales sud-sahariennes est, le plus souvent, de type gravitaire. Les terres cultivées sont, de ce fait, dominées par les canaux d'irrigation. Pour cela, les canaux principaux sont situés sur des levées alluviales qui sont les points hauts. Du fait de la dynamique fluviale de mise en place des matériaux, ces unités de milieu sont sablonneuses et, par suite, très perméables. Il en résulte une forte infiltration au droit des canaux qui contribue à la suralimentation des nappes et à leur remon-

tée ; d'autant que, souvent, les canaux principaux restent en eau toute l'année.

Par ailleurs, la plupart des ces périmètres irrigués sont cultivés en riz (soit dès leur origine, soit parce qu'on ne peut plus y cultiver autre chose). On sait que la riziculture nécessite la submersion des casiers pendant plusieurs mois. La percolation même relativement lente de l'eau à travers les sols des rizières participe également à exhausser le niveau des nappes. Si, dans les terres très argileuses des cuvettes de décantation, ceci n'est pas très important, en revanche, dans les sols limoneux des petites levées ou des deltas d'épandage qui couvrent plus de 50 % des surfaces, cette alimentation des nappes est particulièrement significative. Plus encore, lorsque, pour diverses raisons, des sols sableux (normalement impropres à la riziculture) sont ainsi cultivés, l'alimentation des nappes est importante.

D'une manière générale, on observe un gaspillage considérable de l'eau (les coefficients d'efficacité sont à peine supérieurs à 50 %). A cet égard, et pour limiter les gabegies, il est envisageable, pour de nouveaux périmètres, d'amener l'eau dans des canaux en dessous du sol naturel des parcelles, à charge pour les paysans de la remonter dans les champs par des moyens appropriés, ce qui est de pratique courante en Égypte. L'eau ainsi économisée pourrait être utilisée soit pour l'irrigation de nouvelles terres, soit pour augmenter les surfaces en double culture. Ceci est particulièrement important en période de décrue (ou contre-saison) pendant laquelle les débits

R. Bertrand : CIRAD-CA, BP 5035, 34032 Montpellier, France.
B. Keita, M.K. N'Diaye : IER, BP 438, Bamako, Mali.

d'eau disponibles sont souvent très limités. A cet égard, on est en droit de se demander si la double culture de riz ne pourrait pas être remplacée par d'autres céréales de contre-saison moins exigeantes en eau, à condition, bien entendu, que les sols et l'environnement économique s'y prêtent.

• Dysfonctionnements du réseau d'assainissement

Le réseau d'assainissement fonctionne mal. En effet, les plaines alluviales considérées sont extrêmement plates ; aussi, est-il nécessaire de prolonger très loin les grands collecteurs d'assainissement. Pour cela, ils sont ouverts sur d'anciens défluent, mais ceux-ci sont partiellement obstrués par des atterrissements éoliens et autres seuils locaux. Enfin, le lit de ces anciens bras est tapissé de matériaux fins, l'eau ne s'y infiltre que très lentement.

Ces difficultés d'évacuation des eaux excédentaires sont encore compliquées, à l'Office du Niger, par le fait que, parfois, le substratum des alluvions a subi, pendant le Quaternaire, des mouvements tectoniques, soulevant des blocs ici, en abaissant d'autres là [2]. Par suite, la circulation des eaux souterraines est très perturbée, voire même interrompue, localement, par des seuils. La réalité et l'importance de ce type de problème ne sont pas encore clairement élucidées et ne pourront l'être que par un minimum de recherches hydrogéologiques et géophysiques. Par ailleurs, le réseau d'assainissement, à l'intérieur ou à la périphérie des aménagements, est souvent mal entretenu ou même dégradé volontairement (barré) pour pouvoir pratiquer des cultures en dehors des périmètres.

• Conséquences

Cet ensemble de faits a contribué à l'exhaussement des nappes et à la dégradation des eaux.

La remontée des nappes phréatiques ne paraît pas en elle-même un facteur défavorable pour la riziculture. Bien au contraire, une nappe peu profonde joue le rôle de niveau imperméable et permet de cultiver du riz même sur des sols normalement inaptes car trop perméables.

La remontée des nappes s'étend bien au-delà des terres irriguées, ce qui n'a pas que des implications négatives.

Jusqu'à présent, à quelques rares cas

près, l'évaluation de la remontée des nappes n'a pas fait l'objet d'observations et de mesures répétées dans le temps. Cependant, le cas de l'Office du Niger au Mali est symptomatique : les nappes sont montées d'environ 50 m en 50 ans au droit des périmètres irrigués tandis qu'à une vingtaine de kilomètres des aménagements la nappe remonte plus lentement d'environ 0,5 m par an.

Comment l'exhaussement des nappes contribue-t-il à la dégradation des sols ?

Les causes de la sodisation/alcalinisation

La sodisation/alcalinisation des sols est un phénomène assez inattendu ; en effet la plupart des grands fleuves sud-sahariens ont des eaux très douces, peu minéralisées. Aussi, en utilisant les règles d'évaluation connues jusqu'à ces dernières années, conductivité électrique (CE) et rapport du sodium adsorbable (SAR), [3] ces eaux ont été considérées comme excellentes pour l'irrigation. Cependant, elles présentent un déséquilibre ionique natif vers le pôle sodique et bicarbonaté qui s'accroît lorsque les eaux se concentrent par évaporation [4, 5].

Pour expliquer la dégradation des sols sous l'effet de l'irrigation, deux hypothèses complémentaires doivent être envisagées : d'une part, une charge minérale acquise lors de la remontée de la nappe dans des lentilles d'alluvions sodiques, et d'autre part une dégradation de la qualité des eaux d'irrigation liée à sa concentration au cours du cycle cultural, suivant des mécanismes méconnus auparavant.

• La prise en charge du sodium contenu dans des argiles sodiques

Il est dans le domaine du possible que, en remontant, de 30 à 50 m de profondeur, ces nappes se soient chargées en sodium en traversant des lentilles ou des couches d'alluvions sodiques, voire des couches à évaporites. En effet pendant des phases hyperarides du Quaternaire terminal, et à plusieurs reprises, les cours des grands fleuves sud-sahariens ont été barrés par des dunes. En arrière de ces barrages s'étendaient des lacs temporaires dans lesquels les eaux ont pu se concentrer jusqu'à la précipitation de sels solubles

alors piégés dans les alluvions. De tels barrages dunaires sont encore bien visibles dans le delta du Sénégal et dans le delta du Moyen Niger, notamment à proximité immédiate des périmètres de l'Office du Niger au Mali.

Cependant, cette hypothèse d'une dégradation des eaux des nappes par dissolution de sels dans les alluvions profondes reste à prouver. Comme le chimisme des eaux n'a certainement pas varié beaucoup au cours du Quaternaire, il faudra, pour cela, faire des études d'hydrogéologie et de sédimentologie fine dans des zones non encore modifiées par les périmètres irrigués. Il sera peut-être aussi nécessaire de faire appel à des analyses isotopiques de l'eau des nappes.

• La dégradation des eaux d'irrigation

Les nappes sont d'abord alimentées par des eaux qui ont subi une faible concentration dans les canaux et sont donc peu dégradées. Mais le niveau de sodisation/alcalinisation des eaux des nappes phréatiques est sans commune mesure avec cette altération, significative mais légère. La concentration des eaux des nappes par évaporation de la frange capillaire dans les mois qui suivent la fin de la culture du riz est un mécanisme autrement puissant, car il perdure bien après la fin des cycles culturaux et reprend, par remontée capillaire, les eaux des nappes déjà dégradées qui ne sont alors plus renouvelées par de nouveaux apports d'eau. Dans ce cas, le déséquilibre ionique natif des eaux des grands fleuves sud-sahariens vers le pôle sodique tend à s'accroître. En effet les eaux de ces fleuves (tableau 1) sont non seulement sodiques mais ont une alcalinité positive. Comment se passent les phénomènes et quelles en sont les conséquences ?

• Bases chimiques pour la compréhension de la dégradation des eaux

Selon Bourrié [6], l'alcalinité est « la somme des concentrations des bases faibles multipliée par le nombre de protons que chacune de ces bases peut neutraliser moins la concentration en protons de la solution. Le plus souvent ces bases sont constituées par des espèces carbonatées ».



Photo 1. Efflorescences sodiques et salant noir sur sol sableux de delta de rupture de Haute levée près de Diabali (cliché R. Bertrand).

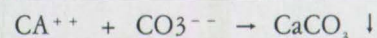
Photo 1. Efflorescences of sodic carbonate (black spots) and sulfate (white spots) on sandy soil banks near Diabali.

« Lorsque l'on combine cette définition avec l'équation de neutralité électrique au sein de la solution du sol, on obtient la relation suivante :

$$\text{Alc.} = 2\text{Ca}^{++} + 2\text{Mg}^{++} + \text{K}^{+} + \text{Na}^{+} - \text{Cl}^{-} - \text{SO}_4^{--} - \text{NO}_3^{-} \dots$$

où Ca, Mg, Na,... représentent les quantités totales d'éléments en solution, exprimés en moles / litre » [5].

Le concept d'alcalinité résiduelle introduit par Eaton [7] prévoit que lorsque, par évaporation, la concentration d'une solution atteint la saturation avec la calcite, ce minéral précipite suivant la réaction :



Si l'alcalinité (c'est-à-dire la concentration en espèces carbonatées) est supérieure aux équivalents calcium, l'alcalinité augmente avec la concentration des eaux, tandis que la solution s'appauvrit en calcium. Ceci peut s'écrire :

$$\text{Alc. rés. calcite} = \text{Alcalinité} - 2\text{Ca}^{++}$$

Tableau 1

Composition chimique des eaux de quelques grands fleuves sud-sahariens

	Ca	Mg	K	Na	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO + CO ₃	Alcalinité
Fleuve Niger									
Mali									
Niono	0,13	0,12	0,03	0,13	0,01	0,005	0	—	0,42
Diabali nappe	0,97	0,55	0,99	2,95	0,96	2,13	0,04	16,08	3,37
Niger									
Lossa étiage	0,37	0,21	0,20	0,59	0	0,03	0	1,47	1,35
Fleuve Sénégal									
Kaédi	0,27	0,46	0,03	0,08	0,24	0	—	0,90	0,58
M'Bagne									
Bodj	0,23	0,31	0,03	0,14	0,38	0,15	—	0,55	0,18
Bakao	0,28	0,24	0,02	0,08	0,05	0,19	—	0,08	0,36
Akibé	0,24	0,39	0,04	0,09	0,32	0	—	0,80	0,44
Fleuve Logone									
Lai	0,168	0,126	0,039	0,135	0,011	0,008	0	0,448	0,47
Fleuve Chari									
Shar	0,230	0,186	0,049	0,099	0,014	0,008	0	0,538	0,54

Chemical composition of the water of some major southern - Saharan rivers

Le concept d'alcalinité résiduelle généralisé à la précipitation de plusieurs minéraux introduit par Droubi [8] procède du même raisonnement et permet, par exemple, de prévoir le devenir de la composition de la solution du sol lorsque la concentration de l'eau augmente encore et dépasse le seuil de précipitation du gypse.

$$\begin{aligned} \text{Alc. rés. (calcite + gypse)} &= \\ \text{Alc. rés. (calcite)} + 2\text{SO}_4^{--} &= \\ \text{Alc. rés.} - 2\text{Ca}^{++} + 2\text{SO}_4^{--} & \end{aligned}$$

• Conséquences

Sur l'évolution de la qualité des eaux
Ainsi, en connaissant l'alcalinité et l'alcalinité résiduelle calcite ou l'alca-

linité résiduelle gypse, on peut prévoir le sens de l'évolution de la composition ionique des solutions dès que la saturation avec ces minéraux est atteinte. Lorsque, comme c'est le cas pour les eaux des grands fleuves sud-sahariens (tableau 1), l'alcalinité résiduelle calcite est positive et lorsque l'on atteint la concentration de saturation en calcite, cette dernière précipite. Alors, la teneur en calcium diminue en même temps que la teneur en carbonates, tandis que les teneurs en sodium (qui ne participe à aucune précipitation) croissent. Le même raisonnement peut être fait lorsque l'on atteint la concentration de saturation de l'eau en gypse.

Ainsi, dans les domaines d'application agricoles, le SAR tendra à s'élever :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}/\sqrt{(\text{Ca} + \text{Mg})}}{2}$$

avec Na, Ca, Mg exprimés en meq/l.

Sur l'évolution des sols

Le complexe absorbant du sol ne reste pas sans action sur cette évolution et par libération de calcium, il tend à diminuer l'alcalinité résiduelle qu'il pourra limiter voire inverser, suivant sa charge en calcium. Mais on ne sait, pour l'instant, que peu de choses à cet égard, chaque type de sol pouvant réagir d'une manière particulière. Une façon d'évaluer cette action serait d'introduire dans un modèle thermodynamique général d'équilibre sol-solutions des pseudo-constantes thermodynamiques obtenues à l'aide d'isothermes d'échange [9] sur les sols considérés.

Cependant les réserves du sol en calcium sont limitées. Aussi, à terme, la solution du sol s'enrichira en sodium et en conséquence le SAR augmentera. Or, il existe une relation d'équilibre entre la charge en sodium de la solution et la fixation du sodium sur les argiles [3] :

$$\text{ESP} = 100 (0,01475 \text{ SAR} - 0,0126) / 1 + (0,01475 \text{ SAR} - 0,0126)$$

où ESP = pourcentage de sodium échangeable.

Il en résulte que les argiles se satureront en sodium et conféreront aux sols des propriétés défavorables. Les eaux imposeront aux sols une évolution vers la « voie alcaline » : le pH des sols



Photo 2. Tâches de stérilisation par sodisation sur sol « Danga » cultivé en canne à sucre à Douagabougou (cliché R. Bertrand).

Photo 2. Sterilization spots due to alkalinization on « Danga soils » in the sugar-cane estate of Douagabougou.



Photo 3. Efflorescences sodiques (sulfate de sodium) sur sol « Danga » près du Canal distributeur de Sokolo (cliché R. Bertrand).

Photo 3. Sodic ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) efflorescences on « Danga soil » near the main irrigation channel of Sokolo.

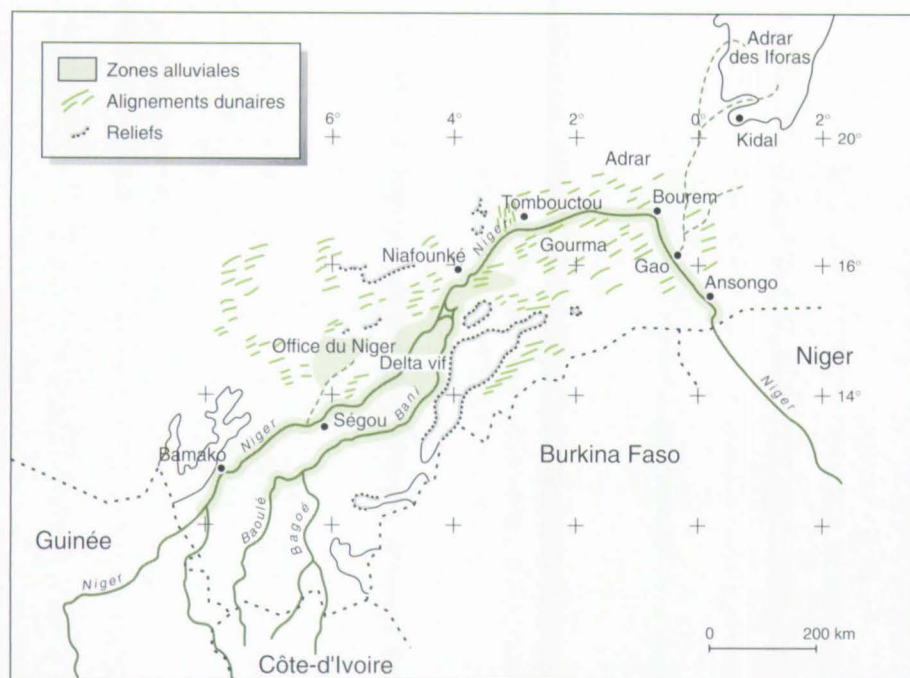


Figure 1. Schéma morphologique du bassin du Moyen Niger.

Figure 1. Morphology of the Middle Niger basin.



Figure 2. Les périmètres irrigués de l'Office du Niger au Mali.

Figure 2. The areas irrigated by the Niger Office in Mali.

augmentera jusqu'à des valeurs comprises entre 8 et plus de 10. Sous l'effet du sodium échangeable et du pH alcalin, dès le début de l'humectation des sols, les argiles défloculeront, avec des conséquences agronomiques désastreuses.

La situation actuelle

L'engorgement

• L'état actuel

Les informations de l'Office du Niger au Mali (figures 1 et 2) sont particulièrement intéressantes. A l'origine, autour des années 40, les nappes étaient situées entre 30 et 50 m de profondeur [1]. Actuellement (figure 3), au droit des périmètres aménagés, la nappe se situe à quelques centimètres de profondeur en saison de culture de juillet à novembre. Avec la vidange des rizières et l'arrêt des irrigations, le niveau piézométrique s'abaisse lentement jusqu'à 1 et 2 m de profondeur suivant la position topographique locale. La figure 1, établie d'après les chiffres de N'Diaye [10] montre, pour diverses dates, la forme du toit de la nappe pour une toposéquence d'environ 1 500 m de long dans un des périmètres irrigués de l'Office du Niger, les piézomètres étant distants de 250 m environ.

Dans l'ensemble, les nappes sont remontées d'environ un mètre par an au droit des périmètres aménagés (Kala inférieur et Kouroumari). Mais les oscillations du niveau des nappes sont, dans le détail, plus complexes, d'une part sous l'effet du régime des irrigations et, d'autre part, en fonction de la granulométrie des sols et de la proximité des canaux d'irrigation [11]. En dehors des terres aménagées, la nappe a aussi monté. Ainsi, à environ une vingtaine de kilomètres des aménagements, elle remonte annuellement d'environ 0,5 m par an.

Dans les périmètres sucriers du Kala supérieur, la montée de la nappe a été encore plus rapide puisque 20 ans seulement après leur création elle est sub-affleurante. L'irrigation étant à peu près continue, le niveau piézométrique reste à peu près constant tout au long de l'année.

Les informations concernant les autres périmètres irrigués sud-sahariens sont

très réduites : au Tchad, dans la vallée du Chari, la remontée des nappes sous l'effet de l'irrigation a été identifiée dans le périmètre sucrier de Banda après une vingtaine d'années d'irrigation. Des études sont en projet pour pallier ce problème encore localisé aux points bas.

• Conséquences agronomiques

Les conséquences agronomiques de la remontée des nappes concernent essentiellement la limitation des cultures possibles du fait de l'asphyxie des racines. A l'Office du Niger, la culture du cotonnier, pratiquée à l'origine dans les vertisols grumosoliques, est maintenant impraticable. A peu de choses près (maraîchage de contre-saison), on en est réduit à une monoculture du riz.

Pour la canne à sucre, la proximité de la nappe, à très faible profondeur, amène à une conduite de l'irrigation particulièrement délicate du fait de la très mauvaise infiltration et de la limitation de l'enracinement (doses faibles, fréquence d'irrigations élevée). A l'opposé, le mûrissement de la canne n'est pas sans poser de problème. Actuellement on peut en évaluer les conséquences économiques par deux chiffres : les rendements de 75 t/ha en cannes vierges chutent aux environs de 25 t/ha dès la première repousse.

L'exhaussement des nappes à plusieurs dizaines de kilomètres des zones aménagées n'a pas que des implications négatives. En effet, lorsque la nappe se trouve à quelques mètres de profondeur, les arbustes peuvent s'y alimenter de sorte que les pâturages sahéliens y sont particulièrement productifs. Les pasteurs disposent aussi d'eau facile à puiser pour l'abreuvement du bétail. Il faut aussi remarquer que, en termes de bilan, cette remontée des nappes, loin des périmètres, participe à une lixiviation profonde et éloignée des ions sodium, ce qui atténue sa vitesse d'accumulation dans les nappes.

Mais la remontée des nappes n'a malheureusement pas qu'un effet direct d'engorgement des sols ; les sols qui baignent ainsi dans ces eaux très sodiques se mettent en équilibre avec elles et deviennent à la fois sodiques et alcalins. De plus, les remontées capillaires alimentent l'évaporation et par conséquent tendent à augmenter la concentration des nappes, processus

Figure 3. Niveaux piézométriques (pz) à diverses dates. La distance entre pz1 et le canal est de 1 500 m.

Figure 3. Piezometric (pz) levels at different dates. The distance between pz1 and the canal is 1 500 m.

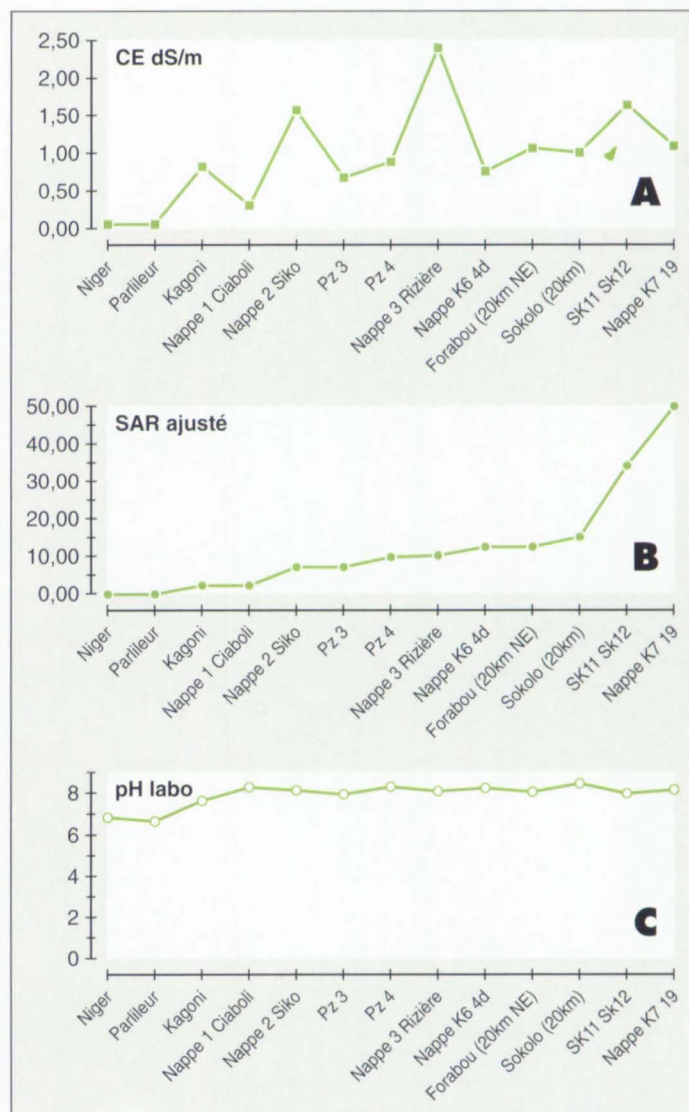
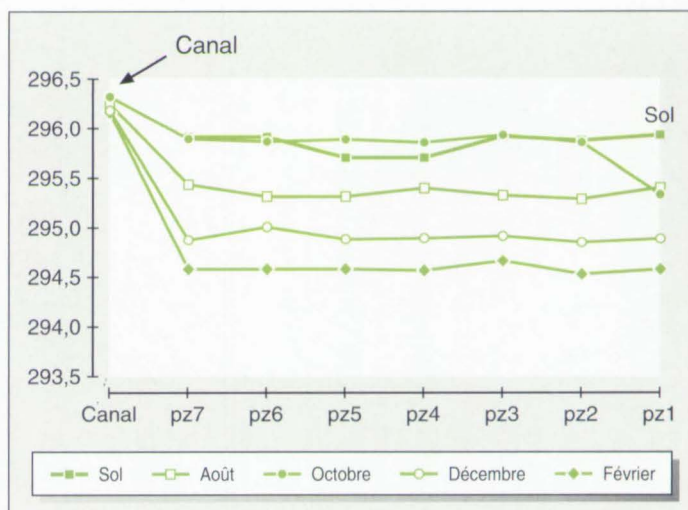
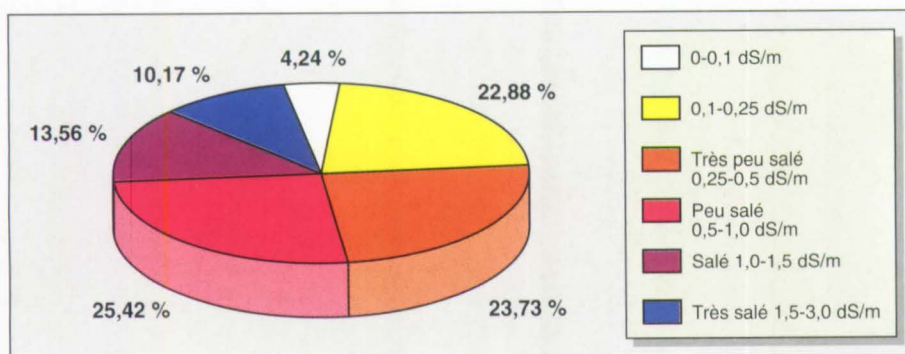


Figure 4. Principales caractéristiques de l'eau du Niger et de quelques nappes des périmètres du Kouroumari à l'Office du Niger.

Figure 4. Main characteristics of the water of the Niger and of water taken from the water table in the Kouroumari area at the Niger Office.



◀ **Figure 5.** Salinité de la nappe : fréquence des valeurs à la mi-juillet 1990.

Figure 5. Water table salinity : frequency of values recorded in mid-July 1990.

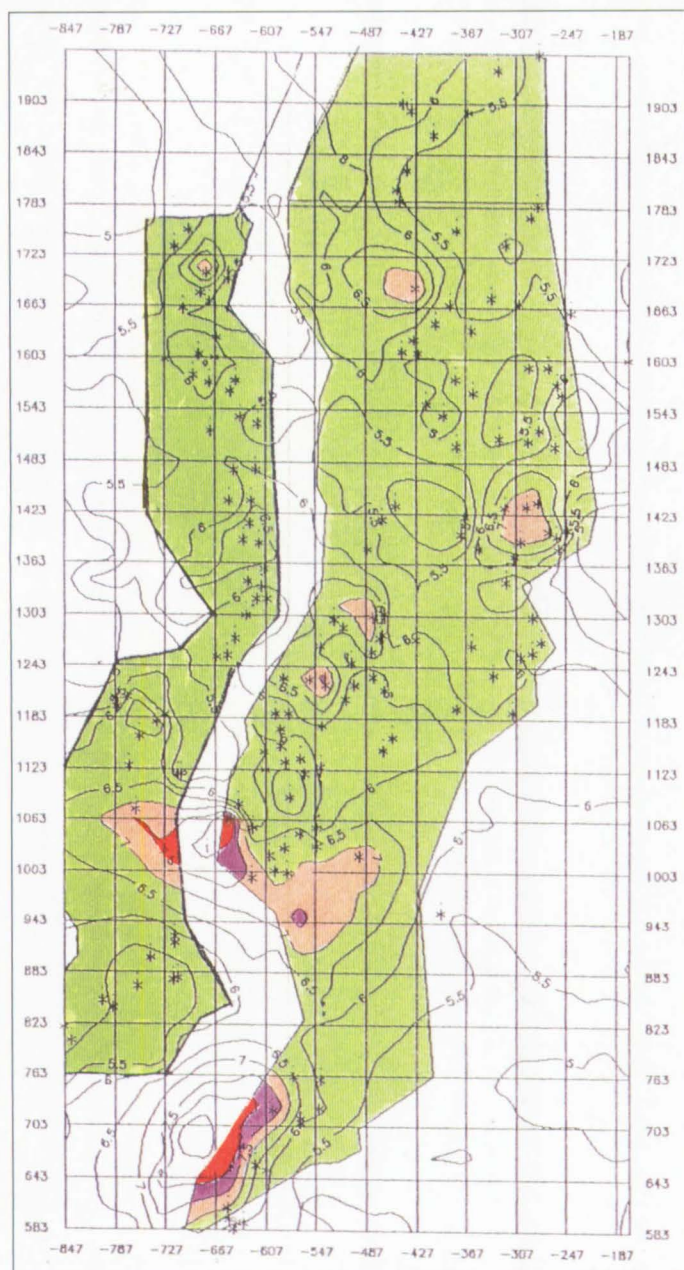


Figure 6A. Courbe d'isovaleurs du pH à l'horizon 0-20 cm (un carreau couvre 400 ha).

Figure 6A. pH values at 0-20 cm of soil depth (one square represents 400 ha).

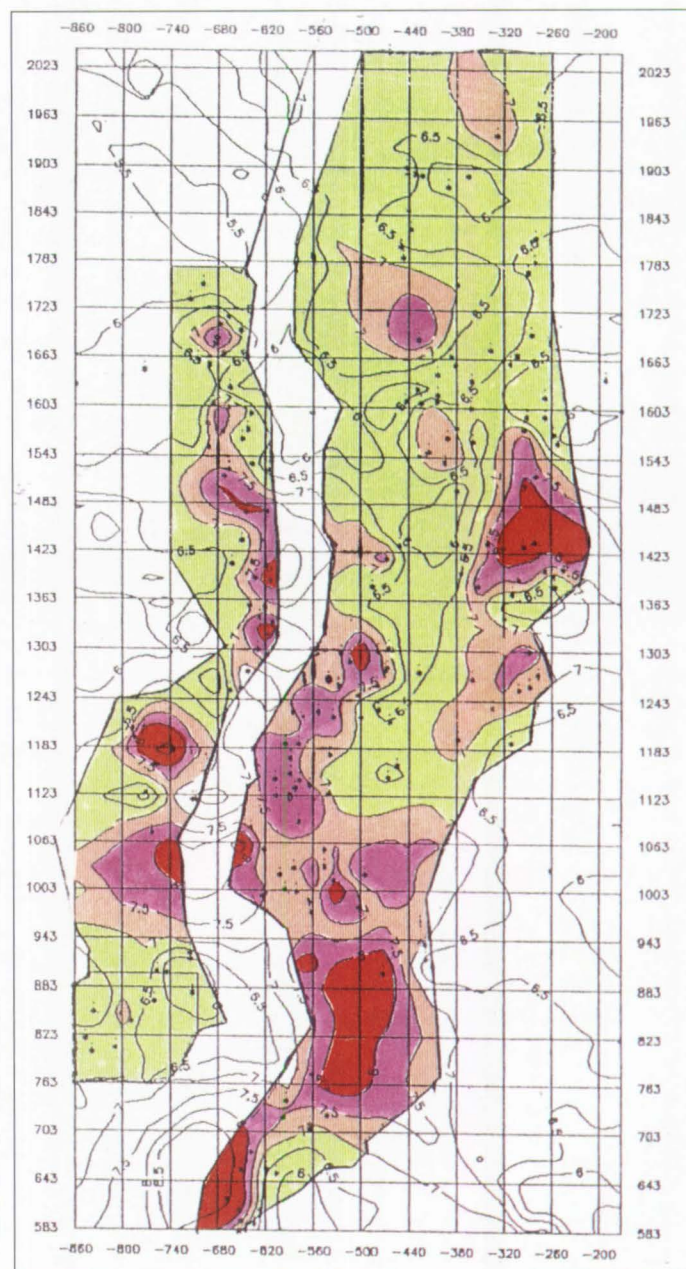


Figure 6B. Courbe d'isovaleurs du pH à l'horizon 20-40 cm.

Figure 6B. pH values at 20-40 cm of soil depth.

moteur de la salinisation, de la sodisation et de l'alcalinisation des eaux et des sols.

Salinisation, sodisation/alcalinisation

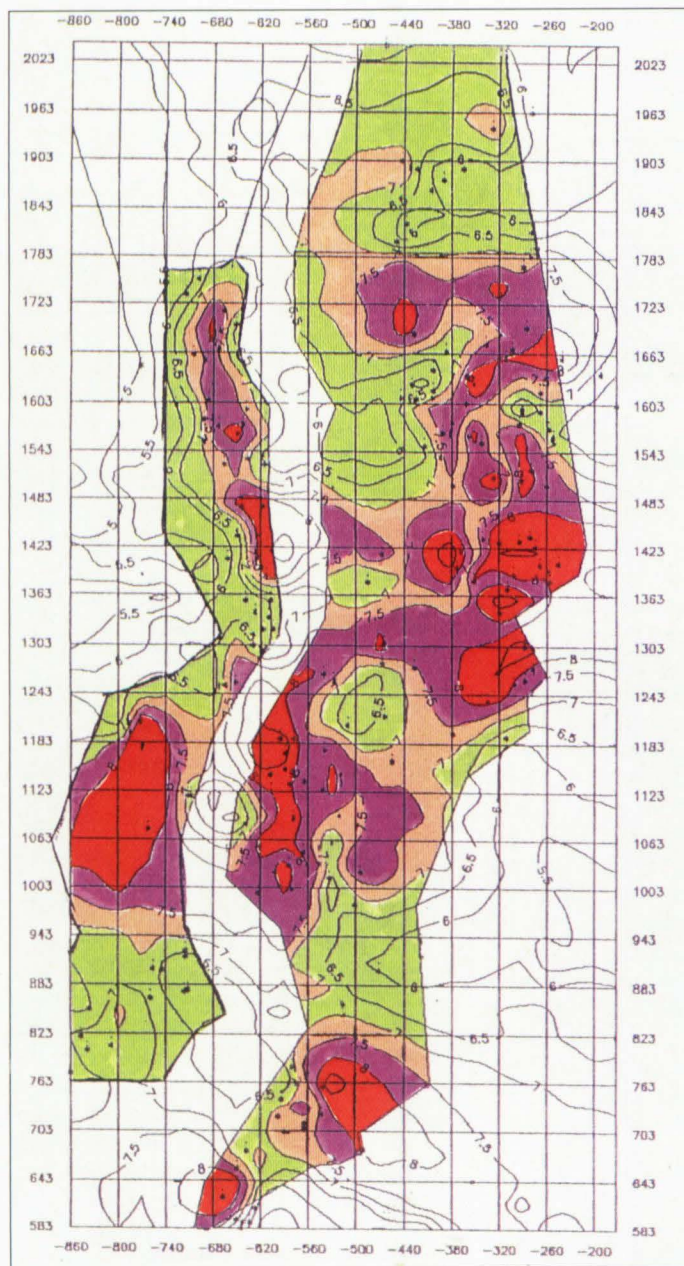
• Critères de distinction entre sols salins et sols alcalins

Il importe de distinguer les phénomènes

de salinisation de ceux de sodisation/alcalinisation.

Le premier consiste en l'accumulation de sels solubles (NaCl — sel de cuisine). La salinisation se manifeste, lorsque les quantités de sels sont importantes, par des efflorescences salines blanches et peut dans les autres cas être détectée, soit en goûtant les sols, soit en mesurant la conductivité électrique d'un extrait aqueux de sol. En général,

du fait de la forte quantité d'électrolytes, le pH des sols salins est neutre. La salinité des sols est un problème banal dans la plupart des périmètres irrigués du monde ; de ce fait, les connaissances concernant la restauration et la conduite de ces sols sont très importantes et permettent de faire face à la plupart des situations. La salure des sols irrigués peut être gérée en termes agronomiques, économiques et juridiques.



La sodisation consiste en la fixation de sodium sur le complexe absorbant des argiles ; l'alcalinisation [12] est une variante de la sodisation qui se manifeste par des pH élevés (souvent largement supérieurs à 8,5) par accumulation de carbonates. C'est un problème bien moins étudié que le précédent. Sa détection est toujours délicate et nécessaire, conjointement à la mesure du pH, d'évaluer le pourcentage de sodium fixé sur le complexe absorbant des sols (ESP). Autant dire que le diagnostic de terrain est difficile. Lorsque la dégradation est importante, on peut voir, en surface, des efflorescences noires. C'est ce qu'il est convenu d'appeler le salant noir. Dans ces taches noires la présence de « Trona » (carbonate de sodium) donne des pH souvent supérieurs à 9, voire 10, de sorte que la matière organique des sols est solubilisée, ce qui leur confère cette couleur noire ou brun-noirâtre caractéristique (*photos 1, 2 et 3*).

Au Mali, ces taches noires sont bien connues des paysans et surtout des cuisinières qui préparent un condiment (*soumbala*) en traitant le contenu des gousses de Néré (*Parkia biglobosa*) par de la potasse ; cette dernière est obtenue en lessivant des cendres. La potasse répandue accidentellement sur le sol donne les mêmes taches noires ; c'est la raison pour laquelle ces efflorescences sont désignées sous le nom de « potasse » par la communauté paysanne de l'Office du Niger.

• L'état actuel d'alcalinisation des sols des périmètres irrigués sud-sahariens

Dans les périmètres irrigués sud-sahariens, l'identification et, plus encore, l'évaluation du degré et des superficies touchées par la salinisation et l'alcalinisation/sodisation secondaire des sols, sont pour l'instant très fragmentaires, sinon inexistantes.

Au Mali

A l'Office du Niger, au Mali, un certain nombre d'observations permettent de se faire une première idée de la gravité du problème.

La *figure 4* présente les principales caractéristiques de l'eau du Niger et de quelques eaux de nappes des périmètres du Kouroumari à l'Office du Niger [11, 13]. Pour permettre les comparaisons, les données ont été clas-

sées par valeur décroissante du SAR. On remarquera (*figure 4A*) que l'eau du Niger est très peu minéralisée (moins de 0,1 dS/m) et que en moyenne les eaux des nappes sont déjà très salées ; tout se passe comme si les eaux d'irrigation s'étaient concentrées d'un facteur 100. Ce qui est plus grave c'est que, en même temps, ces eaux de nappes sont devenues sodiques, SAR voisins de 10 ($ESP \approx 13$), mais pouvant atteindre 50 ($ESP \approx 70$). La comparaison des *figures 4B et 4C* montre que la corrélation entre la salure de l'eau et le SAR est complexe. La *figure 5*, montre, sur 150 échantillons d'eaux prélevés dans des piézomètres [10] des périmètres du Kala Inférieur de l'Office du Niger, que presque 50 % des eaux des nappes présentent une salinité marquée et parfois très forte. Mais on ne dispose pas, pour l'instant, des valeurs de la conductivité électrique des sols correspondants.

Les cartes ci-jointes (*figures 6 et 7*) établies, par des méthodes géostatistiques, à partir d'environ 300 profils [14] analysés à trois niveaux (horizon 0-20 = *figure 6A*, horizon 20-40 = *figure 6B*, horizon 50-100 = *figures 6C et 7*) donnent une idée de l'extension et de la gravité de la dégradation par alcalinisation et sodisation des sols à l'Office du Niger. Dans ces cartes chaque carreau couvre environ 400 ha.

Leur comparaison indique-t-elle le sens d'une évolution qui irait en se généralisant ? Dans cette hypothèse et à titre indicatif la carte *figure 6B* (plus de 30 % des terres à $pH \geq 8$) préfigurerait ce qui pourrait être observé dans une dizaine d'années dans les horizons superficiels, tandis que la carte *figure 6C* (plus de 50 % des terres à $pH \geq 8$) préfigurerait l'état de dégradation qui pourrait être atteint dans une quinzaine d'années. Seules des analyses répétées dans le temps sur un grand nombre de placettes permettront de savoir quelle est la vitesse de ce processus de sodisation des sols.

La *figure 7* montre les teneurs en sodium échangeable pour l'horizon 50-100. En comparant cette carte avec celle de la *figure 6C* on remarquera une bonne correspondance entre l'alcalinisation des sols et la sodisation. Cependant, comme on l'a vu plus haut pour les valeurs du SAR et de la conductivité électrique de l'eau des

Summary

Soil degradation in the irrigated areas of the major valleys of the southern Sahara (Case of the Niger Office in Mali)

R. Bertrand, B. Keita, K.M. N'Diaye

In most irrigated areas of the southern Sahara, poor irrigation management, the absence of efficient drainage and the growing of rice on excessively sandy soils, have led to a rapid rise in the water table and an increase in soil sodium/alkaline content and salinity.

In Mali for example, the water table, originally between thirty and fifty meters below ground, now fluctuates between a depth of zero and one meter.

At the Niger Office (in Mali), 50 % of the water table is now salty and occasionally very salty despite the low mineral content of the irrigation water. Even more seriously, these high sodium-containing waters have already caused increases in soil sodium content, and even alkalization over very large areas.

This results in a collapse of soil structure, porosity and permeability, which in turn reduces the mineral supply to crops and causes deficiencies, for example in zinc, and the disappearance of soil nitrogen. This can then lead to increased difficulties in the growing of foodstuffs through substantially reduced production, to a decrease in the choice of possible crops, and finally leads to plots being abandoned. Because of the important role played by these irrigated areas in the food supply of the Sahel countries, the current situation needs to be evaluated and corrective measures implemented. Solutions to prevent such soils, re-organized and rehabilitated at great cost, from becoming sterile, are briefly examined.

Cahiers Agricultures 1993 ; 2 : 318-29.

nappes, la corrélation est loin d'être totale ce qui montre que le problème est complexe tant en lui-même que dans sa distribution géographique.

Les informations concernant les autres périmètres sud-sahariens sont encore plus fragmentaires. Dans la haute vallée du Niger, à climat plus humide et dans les périmètres de Bagoundié (en aval de Koulikoro), certaines informations laissent à penser que la stérilisation des sols est parfois très avancée ; mais il s'agit encore d'informations orales qui demandent à être confirmées.

Dans le delta inondable du Moyen Niger, les traces de sodisation ou d'alcalinisation sont très rares ; Bertrand [15] y a cependant remarqué quelques efflorescences salines blanches qui sont peut-être du sulfate de sodium. Il a aussi noté une augmentation des pH de l'amont vers l'aval. Dans la vallée du Niger, entre Tombouctou et la frontière du Nigeria, des observations [16], faites à la bordure immédiate des plaines inondables et sur des îlots, montrent des taches de salant noir ; mais les sols de la plaine inondable submergés pendant plus de sept mois ne présentent aucune trace détectable à l'œil.

Au Niger

Plus en aval, en République du Niger, des marques nettes de salure et d'alcalinisation des sols des périmètres irrigués de la plaine inondable du Niger ont été observées [17].

Une mention spéciale doit être faite à propos des « terrasses du Niger » entre Tillabéry et Niamey [18]. Il s'agit en fait de glacis d'érosion sur lesquels sont plaquées des alluvions très peu épaisses et discontinues. Les sols sodiques observés sur ces « terrasses » (périmètres de Lossa et une partie de Sona) doivent leur origine à d'autres phénomènes que l'irrigation ; la sodicité et l'alcalinité sont primaires. Il s'agit de sols hérités des paléoclimats du Quaternaire terminal et qui sont connus en d'autres lieux (vallée de la Falémée au Sénégal, en Mauritanie et au Mali ; vallées de Voltas au Burkina Faso ; sols hardés du Nord Cameroun et du Tchad...). Dans ces cas, l'irrigation peut conduire, au début tout au moins, à une restauration de la fertilité des sols ; mais dès que les nappes se seront installées on ne sait quel sera le devenir de ces terres.

Au Sénégal

Dans le delta du Sénégal, on a des sols salés mais dont l'origine est plutôt due, d'une part à la remontée de l'eau de mer à l'étiage et, d'autre part, à la présence de nappes salées également liées à l'incursion d'eaux marines actuelles ou néolithiques [19]. Dans la moyenne et la haute vallée du Sénégal, on ne dispose que de peu d'observations pertinentes (taches brunes de salant noir ? efflorescences de sels non déterminées).

Au Cameroun

Les vallées de la Bénoué, du Logone et du Chari sont aussi mises en valeur par des périmètres irrigués. On n'a que très peu d'informations au sujet d'une sodisation et d'une alcalinisation des sols dans les périmètres irrigués de ces vallées. Tout au plus sait-on qu'il est de plus en plus difficile de labourer les terres du périmètre rizicole de la SEMRI au Nord Cameroun. S'agit-il du résultat de façons culturales trop intenses ? S'agit-il d'un compactage lié à une sodisation/alcalinisation ou des deux à la fois ?

Au Soudan

Il convient d'évoquer aussi les périmètres irrigués est-africains. D'abord la Gésirah au Soudan, dans la vallée du Nil ; des informations récentes (S. Valet, communication orale) montrent que le problème de sodisation/alcalinisation existe contrairement aux allégations officielles ; bien entendu, les sols ne montrent pas encore des ESP (pourcentage de sodium échangeable) équivalents ou supérieurs à 15 et ne peuvent, de ce fait, être considérés comme des solonetz ; cependant les analyses de sols montrent que vers le nord (et les régions pré-sahariennes) les teneurs en sodium échangeable sont loin d'être négligeables et que les pH sont souvent supérieurs à 8. Lorsque les eaux d'irrigation sont peu minéralisées, comme c'est le cas ici, la défloculation des argiles et la compaction des sols est produisent bien avant le seuil fatidique d'un ESP supérieur à 15. Des observations systématiques devaient être entreprises pour confirmer, infirmer ou nuancer les informations ponctuelles dont il est fait état ici.

En Somalie

En Somalie, la salinisation et la sodisation/alcalinisation des sols sont com-

munes ; les bananeraies qui font la richesse de la basse vallée du Chebeli sont fréquemment ruinées et doivent être déplacées. Pourtant, les eaux du fleuve ne sont dangereuses que pendant une très courte période de l'année.

Au Kenya

Enfin, au Kenya les rivières torrentielles et instables, qui dévalent des reliefs volcaniques de la bordure est du grand rift, viennent mourir dans de vastes plaines d'épandages alluviaux ou torrentiels. Plus on progresse vers l'aval de ces plaines et plus les sols y sont sodiques, voire salés. Les sols des petits périmètres irrigués qui y sont installés sont vite dégradés.

• Conséquences agronomiques

En Afrique sud-saharienne, peu d'observations agronomiques ont été mises en relation avec l'état de dégradation des sols par alcalinisation. A titre d'illustration, on peut citer le cas d'une parcelle appartenant au projet Retail (Office du Niger) très touchée par le salant noir. Quelques mesures ont été prises pour tenter d'en limiter les effets (en fait on y a appliqué des techniques qui sont requises pour les sols salins). Les parties apparemment « atteintes » ont donné un rendement quatre fois moindre que les parties apparemment peu touchées. Cette illustration amène à exposer les principales conséquences agronomiques de la sodisation/alcalinisation des sols. La technique du repiquage permet de contourner, provisoirement et partiellement, l'alcalinité des sols par dilution de la solution du sol et sa mise en équilibre avec la pression partielle en gaz carbonique de l'atmosphère [20].

La dispersion des argiles, sous l'effet du sodium échangeable et du pH alcalin, en est le processus moteur. La baisse de la vitesse d'infiltration est une première conséquence. Elle amène des difficultés croissantes de conduite des irrigations. A l'Office du Niger, en riziculture traditionnelle, avec semis direct sous les pluies, cela se manifeste par des levées très irrégulières.

La sodisation/alcalinisation provoque aussi un effondrement de la structure et, comme c'est le cas à l'Office du Niger, la porosité est réduite au tiers de sa valeur initiale, tandis que la perméabilité, mesurée au laboratoire, est

réduite de moitié [21] par rapport aux valeurs mesurées 30 ans plus tôt [22]. Il s'ensuit une forte compacité qui se traduit par des difficultés croissantes : de conduite des opérations culturales (labour notamment) et de pénétration des racines en profondeur (au Mali, le front de colonisation racinaire est limité à 20 ou 30 cm de profondeur). Sur les plantes sensibles, des effets de toxicité, liés à la présence de sodium échangeable peuvent être observés. Aux pH élevés sont inféodés des blocages de l'alimentation des cultures, des carences minérales induites (zinc notamment) et une volatilisation de l'azote [23].

Cela se traduit par la réduction du choix des cultures possibles, par une réduction substantielle de la production et, *in fine*, l'abandon des terres par les paysans. Ainsi à l'Office du Niger, seule la riziculture est maintenant praticable, et encore est-ce avec des rendements très faibles.

A terme, la faillite de ces grands périmètres irrigués, créés et maintenant réhabilités à grands frais, paraît inéluctable si l'on n'intervient pas, avec toutes les conséquences désastreuses prévisibles pour l'équilibre alimentaire précaire des pays sahéliens. Bien entendu, les périmètres irrigués n'en sont pas encore à ce stade et des interventions techniques peuvent prévenir ou remédier à cette évolution.

Les solutions

Des techniques de prévention existent ; elles consistent d'abord à limiter la remontée des nappes. Les méthodes de restauration quant à elles consistent à déplacer le sodium fixé sur les argiles et à l'éliminer du sol par lixiviation, ce qui nécessite conjointement l'application d'amendements minéraux et la mise en œuvre d'un drainage profond.

Limitation de la remontée des nappes

Les techniques de prévention consistent d'abord à limiter la remontée des nappes par :

- élimination des sols sableux inaptes à la riziculture irriguée ;
- contrôle strict des doses d'irrigation ; cela suppose à la fois la réalisation d'aménagements soignés et une

discipline sévère de la conduite de l'irrigation qui impliquent une éducation et une responsabilisation des communautés paysannes ;

- amélioration du réseau d'assainissement actuel, approfondissement de ce réseau pour le transformer en véritable réseau de drainage profond des sols ;
- mise à sec éventuelle des canaux d'irrigation hors saison de culture ;
- concentration de la double culture du riz sur un ou deux distributeurs au lieu de la disperser sur l'ensemble des périmètres ;
- bétonnage des canaux, etc.

Restauration des sols salsodisés

Pour restaurer les sols dégradés par le sodium échangeable, on préconise [2], le plus souvent, l'application d'amendements minéraux. L'amendement le plus commun est le gypse ; mais les premières études sur la dynamique de l'évolution des ions montrent que ce type d'amendement ne peut être utilisé que dans certaines conditions [5, 11]. Il convient donc de trouver des amendements adaptés. Sans parler des formes, des doses, des modalités (dans l'eau d'irrigation ou sur les sols) ou des fréquences d'application, il faut bien prendre en compte le fait que les quantités d'amendements sont telles qu'il est nécessaire de faire appel à des ressources locales ou bien à des ressources dont le coût de transport est faible.

La conduite du drainage doit également être adaptée à l'abaissement du niveau général des nappes et à l'élimination des ions sodium. Elle doit donc être adaptée au régime hydrologique des sols (fonction du type de culture, voire du système de culture). On comprendra aisément que la mise en œuvre de ces techniques soit complexe et doive être adaptée au cas par cas par voie expérimentale. Cela est long, coûteux et peu extrapolable à des situations différentes.

Aussi, une autre voie pour le choix des types, des doses et des fréquences d'application des amendements serait d'établir des modèles d'évolution des ions dans les eaux d'irrigation, (ou les nappes) en voie de concentration par évaporation. Les concepts présidant à l'élaboration de ces modèles existent déjà, mais ils doivent être complétés par l'établissement de modèles

d'échanges d'ions entre le sol (et son complexe absorbant) et les nappes phréatiques (ou solution du sol). Il deviendrait alors possible d'extrapoler les résultats et méthodes de prévention et de restauration de la fertilité de ces sols. Il suffirait de caler les modèles par un nombre limité d'analyses ou d'expérimentations dans les diverses situations susceptibles d'être rencontrées en Afrique sud-saharienne. Ces modèles de simulation thermodynamique de l'évolution de la composition des solutions et des relations d'équilibre sol-solutions constitueraient un outil de diagnostic, de suivi, d'avertissement et de conseil ; outil qu'il conviendrait de conforter par la vérité du terrain.

Conclusion

Dans la plupart des périmètres irrigués sud-sahariens la mauvaise gestion de l'irrigation, l'absence de système de drainage efficace et la riziculture pratiquée sur des sols trop sableux ont conduit à une rapide remontée des nappes phréatiques et à l'engorgement des sols.

Dans le passé, en raison de la très faible minéralisation, les eaux des grands fleuves sud-sahariens ont été considérées comme de grande qualité pour l'irrigation. Les concepts actuels de jugement de la qualité des eaux d'irrigation montrent au contraire, que ces eaux, lorsqu'elles se concentrent par évaporation, deviennent sodiques et présentent un fort risque de sodisation et d'alcalinisation des sols. Les observations de terrain et les analyses d'eaux et de sols confirment la réalité de cette évaluation pessimiste.

Au Mali, à l'Office du Niger, 50 % des eaux des nappes sont maintenant salées et parfois très salées ; mais, ce qui est plus grave, c'est que ces eaux sont très sodiques (SAR > 10) et ont entraîné une sodisation, voire une alcalinisation des sols (acides à l'origine) sur des superficies déjà très importantes. Il en résulte un effondrement de la structure des sols, de la porosité (réduite au tiers de sa valeur initiale) et de la perméabilité (réduite de moitié) ; tandis que, du point de vue de l'alimentation minérale des cultures, des carences minérales induites peuvent apparaître (zinc) et que l'azote

des sols peut être volatilisé. Tout cela se traduit par des difficultés croissantes de conduite des opérations culturales, par une réduction substantielle de la production, par la réduction du choix des cultures possibles, et, *in fine*, par l'abandon des casiers.

Les techniques de prévention consistent d'abord à limiter la remontée des nappes.

Les méthodes de restauration, quant à elles, consistent à déplacer le sodium fixé sur les argiles et à l'éliminer du sol par lixiviation, ce qui nécessite conjointement l'application d'amendements minéraux et la mise en œuvre d'un drainage profond. Il s'agit de techniques complexes qui nécessitent d'abord une bonne connaissance des mécanismes et des implications prévisibles au niveau régional (devenir des eaux de drainage, coût économique par exemple).

Compte tenu de l'importance de ces périmètres irrigués dans l'équilibre des besoins alimentaires des pays sahéliens, on comprendra qu'il ne faille ni attendre pour évaluer l'état actuel, ni différer les recherches pour la mise au point de mesures correctives afin de lutter contre la stérilisation de ces terres aménagées et réhabilitées à grand frais ■

Résumé

Dans la plupart des périmètres irrigués sud-sahariens, la mauvaise gestion de l'irrigation, l'absence de système de drainage efficace et la riziculture pratiquée sur des sols trop sableux ont conduit à une rapide remontée des nappes phréatiques, à la sodisation/alcalinisation et à la salinisation des sols.

Au Mali, par exemple, la nappe située à l'origine entre trente et cinquante mètres oscille maintenant entre zéro et un mètre de profondeur.

A l'Office du Niger (Mali), malgré la très faible minéralisation de l'eau d'irrigation, 50 % des eaux des nappes sont maintenant salées et parfois très salées. Fait plus grave, ces eaux sont très sodiques ($SAR \gg 10$) et ont entraîné une sodisation, voire une alcalinisation des sols sur des superficies déjà très importantes. Il en résulte un effondrement de la structure des sols, de la porosité et de la perméabilité ; tandis que du point de vue de l'alimentation minérale des cultures des carences induites peuvent apparaître (zinc) et que l'azote des sols peut être volatilisé. Cela se traduit par des difficultés croissantes de conduite des opérations culturales, par une réduction substantielle de la production, par la réduction du choix des cultures possibles, et, *in fine*, par l'abandon des casiers.

Étant donné l'importance de ces périmètres irrigués dans l'équilibre des besoins alimentaires des pays sahéliens, il convient d'évaluer la situation actuelle et de mettre au point des mesures correctives. Les solutions, pour éviter que ces sols aménagés et réhabilités à grands frais ne se stérilisent, sont examinées.

Références

1. Béline EL. Les travaux du Niger, Gouvernement général de l'AOF. Publication de l'Office du Niger, 1940 : 219 p.
2. Keita B, Bertrand R, Blanck JP, Tricart J. Étude morphopédologique de reconnaissance du Kala inférieur au 1/50 000, IER éditeur Bamako, Mali, 1989 : 56 p., 1 carte couleur.
3. Richards LA. Diagnosis and improvements of saline and alkali soils. USDA, Handbook, 1954 ; 60 : 160 p.
4. Gac JY. Géochimie du bassin du lac Tchad Tra-vaux et documents de l'ORSTOM, 1980 ; 123 : 251 p.
5. Valles V, Bertrand R, Bourgeat F, N'Diaye K. Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques — Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'Oued Med-jerdah (Tunisie). *L'Agron Trop* 1989 ; 44 : 157-63.
6. Bourrié G. Relation entre le pH, l'alcalinité, le pouvoir tampon et les équilibres de CO_2 dans les eaux naturelles. *Sci du sol* 1976 ; 3 : 141-59.
7. Eaton FM. Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Sci* 1950 ; 69 : 123-33.
8. Droubi A. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodyna-mique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. *Sci Géol, Mémoire n° 46*, 1976 : 177 p.
9. Fallavier P, Breyse M, Olivin J. Étude expérimentale de la dynamique du potassium dans deux sols tropicaux utilisés pour la culture du palmier à huile. *Oléagineux* 1989 ; 44 : 197-207.
10. N'Diaye K, Van Slobbe E, Risselada, Dombia Y. Identification de l'alcalinisation/salinisation des sols de l'Office du Niger. Zone de Niono. Rapport IER, 1990 : 27 p. et annexes
11. N'Diaye K. Évaluation de la fertilité des sols de l'Office du Niger au Mali. Contribution à la recherche des causes et origines de la dégradation des sols dans le Kouroumari. Thèse Dr Ingénieur, Inst. Polytechnique, Toulouse, 1987 : 134 p, 34 fig.
12. Servant JM. La salinité dans le sol et les eaux. Caractérisation et problèmes d'irrigation, drainage. *Bull BRGM* 1978 ; III : 123-42.
13. Bertrand R. Sodisation et alcalinisation des sols à l'Office du Niger. Rapport IRAT, 1985 : 25 p.
14. Bertrand R. Alcalinisation et sodisation des sols. In : Keita B, Koukandi B, Dioni L, eds. *Étude morphopédologique du Kala inférieur*. Rapport IER, 1991 : 75 p., 6 cartes, annexes 300 p.
15. Bertrand R. Étude morphopédologique de quelques plaines du delta vif du Moyen Niger (Mali). Rapport IRAT, 1973 ; 117 p., cartes HT, annexes.
16. Bertrand R, Bourgeon G. Évaluation du milieu naturel des plaines alluviales de la boucle du Niger (Mali). I Le milieu et II Potentialités *L'Agron Trop* 1984 ; 39 : 199-215.
17. Bozza JL. Mise en valeur hydro-agricole des terrasses du fleuve Niger. Rapport final, volet recherche 1989 : 29 p.
18. Barbiero L. Contribution à l'amélioration fon-cièrre des terrasses du fleuve Niger. Périmètres de Lossa et Sona (Niger). Mémoire ENSAT, CIRAD-IRAT, 1990 : 56 p.
19. Durand JH. Étude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal. Étude pédologique. SEDRAGRI 1973 : 252 p.
20. Guillobez S. Variations du pH et du bilan des ions majeurs, conduite de la riziculture aquatique dans les sols à fort déséquilibre ionique. *L'Agron Trop* 1989 ; 44 : 3-12.
21. Toujan M. Aménagement hydro-agricole dépendant du canal du Sahel. Évolution des sols irrigués. Rapport de l'Office du Niger. SOGREHA 1980 : 16 p.
22. Dabin B. Contribution à l'étude des sols du delta central Nigérien. *L'Agron Trop* 1959 : 601-37.
23. Sahrawat KL. Ammonia volatilisation in some tropical flooded rice soils under field conditions. *II Riso* 1980 ; 29 : 21-7.